

DOI: 10.7667/PSPC180005

# 复杂工况下并联型电能质量补偿装置净现值比较研究

袁 敞<sup>1</sup>, 郝 毅<sup>1</sup>, 冯佳耀<sup>1</sup>, 马 明<sup>2</sup>, 徐衍会<sup>1</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;  
2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080)

**摘要:** 配电台区谐波、无功和三相不平衡等电能质量问题逐渐突出, 电能质量补偿装置运行工况变得复杂。为了深入分析有源、无源和混合三类并联型补偿装置在复杂工况下的经济性, 对三类装置进行净现值比较研究。首先, 对配电台区电能质量补偿装置的运行工况进行实地调研, 采用实测数据对三类装置在复杂工况下的补偿效果进行仿真研究。其次, 针对仿真结果采用净现值法对补偿装置进行经济性评估, 推导出三类装置的净现值表达式, 分析并得到了复杂工况下三类装置随谐波、不平衡电流和无功功率变化的净现值大小关系变化区域。最后, 通过实例计算进一步验证了该分析结果。

**关键词:** 复杂工况; 电能质量; 补偿装置; 净现值; 经济性评估

## Research on the net present value comparison of shunt power quality compensators under complex conditions

YUAN Chang<sup>1</sup>, HAO Yi<sup>1</sup>, FENG Jiayao<sup>1</sup>, MA Ming<sup>2</sup>, XU Yanhui<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** Power quality problems such as harmonics, reactive power and unbalance in distribution network are becoming more and more prominent, so the operating conditions of the power quality compensators become complicated. In order to analyze the economy of active, passive and hybrid compensators under complex conditions, the net present value comparison research of the three shunt compensators is carried out. Firstly, the field investigation is carried out on the operating conditions of the power quality compensators in distribution network, and the compensation effects of the three types of compensators under complex conditions are simulated by the measured data. Secondly, according to the simulation results, the economic evaluation of the compensators is carried out by net present value method. The net present value expressions of the three compensators are derived, and the net present value changed areas with the change of harmonic, unbalanced current and reactive power under complex conditions are obtained. Finally, an example is given to verify the analysis results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677066).

**Key words:** complex conditions; power quality; compensator; net present value; economic evaluation

## 0 引言

随着经济产业的多样性发展, 社会分工细化, 配电网负荷类型日趋多样, 谐波、无功、不平衡等电能质量问题逐渐突出并且变化复杂, 影响恶劣不容忽视。并联型电能质量补偿装置是配电网电能质

量控制中应用最为广泛的装置<sup>[1]</sup>, 包括无源、有源和混合三种类型, 分别是指并联电容器和无源滤波器、静止无功发生器和有源电力滤波器以及有源与无源联合运行的补偿装置。这些装置的应用均能对配电网的电能质量进行改善, 但由于各类装置的补偿效果不同, 经济性也必将存在差异。目前对各类装置拓扑结构和控制方法的研究已经较为成熟<sup>[2-4]</sup>, 关于装置补偿经济性的讨论也逐渐成为热点。

基金项目: 国家自然科学基金资助(51677066)

2002年,美国电科院专家 Mark McGranaghan 对比了不同补偿方案的年均成本,以年均成本最少为目标确定最优方案<sup>[5]</sup>。2005年,东南大学唐国庆团队针对电能质量改善方案的成本效益,以一家包装纸制造企业电压暂降补偿为例说明了应用年值法确定改善方案具有可操作性,能够满足实际应用的需要<sup>[6]</sup>。2007年,英国曼彻斯特大学 Jovica. V. Milanovic 团队建立了电压暂降的经济成本评估模型,求出最小的电压暂降经济成本,从而获得了电能质量治理设备的优化配置方案<sup>[7]</sup>;2010年,该团队基于净现值法和投资回收期法,以投资费用最小为优化目标,应用改进遗传算法分析了 SVC、STATCOM、DVR 三种装置的经济效益,得出经济性最优的电能质量补偿装置应用方案<sup>[8]</sup>。2013年,国网北京电科院周作春等人以 UPS 和 DVR 为例,建立了用户级事件型电能质量补偿装置的应用效果评估模型<sup>[9]</sup>。以上经济性评估研究成果多针对串联型补偿装置,对于并联型补偿装置经济性评估的讨论多集中在无功补偿的问题上。2009年,华南理工大学张勇军团队提出一种配电线路 10 kV/0.4 kV 综合无功优化配置数学模型对并联电容器进行经济性评估,把网损减小量作为无功补偿经济效益<sup>[10]</sup>,但未考虑补偿装置成本。2015年,国网南京供电公司何谋超等人针对城市变电站无功补偿,采用全寿命周期法对并联电容器、SVG、并联电容器与 SVG 混合三种并联型补偿装置进行经济性评估。评估结果表明,采用并联电容器与 SVG 混合装置的补偿方案更具经济性<sup>[11]</sup>,但是该结果仅针对补偿成本进行评估,没有考虑补偿的经济效益,评估结果并不全面,不能体现出负载工况变化对评估结果的影响。2016年,华北电力大学陶顺团队,对净现值法、投资回收期法、内部收益率法及全寿命周期成本法等投资评估方法在电能质量补偿方案经济性评估上的适用性进行了分析,分析结果指出净现值法不但考虑了资金时间价值因素,而且计及了项目周期的全部现金流量,经济效益评价相对更为全面<sup>[12]</sup>。

因此,本文采用净现值法对有源、无源和混合三类并联型补偿装置进行经济性评估。针对无功、谐波、不平衡电流随时间变化的复杂工况,对三类装置净现值大小关系的变化区域进行推导和分析,给出三类装置随复杂工况变化的动态经济性评估结果,并进行实例计算。

## 1 电能质量补偿系统与装置

### 1.1 补偿系统

随着非线性和冲击性负荷比重增加<sup>[13-14]</sup>,配电网

电能质量问题日益严重,导致谐波含量增大、不平衡程度加深、无功需求明显,这些电能质量问题在配电变压器和线路造成的损耗不可忽视。

在配电网装设电能质量补偿装置是解决配电网电能质量问题中的有效途径,图 1 所示为配电网电能质量补偿系统示意图。补偿装置投运会在一定程度上降低上述电能质量问题带来的电能损耗,这也是补偿装置经济效益的间接体现。

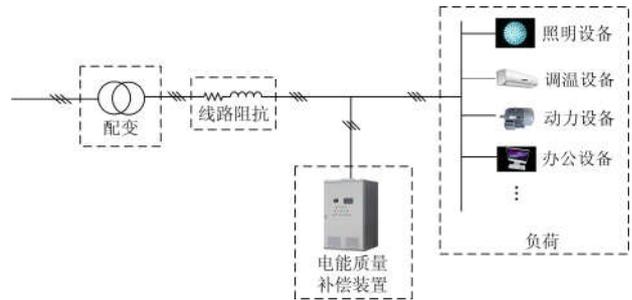


图 1 配电网电能质量补偿系统示意图

Fig. 1 Power quality compensation system in distribution network

### 1.2 补偿装置

配电网电能质量补偿装置主要有无源装置、有源装置和混合装置三种类型。

#### (1) 无源装置

配电网中无源装置一般设计成具有无功补偿功能的无源滤波器,通过设计其调谐频率可确定滤波次数,结构较为简单。通过投切控制,无源装置能补偿大容量无功功率,而且补偿效果稳定<sup>[15]</sup>。无源装置虽然造价便宜,控制简单,但只能补偿固定无功和特定频次谐波,在实际运行中易受电网阻抗影响,故障率较高。

#### (2) 有源装置

配电网中有源补偿装置一般采用并联型的 SVG 和 APF,通过适当的控制策略能实现无功、谐波和不平衡电流快速响应的动态补偿<sup>[16-17]</sup>,补偿效果好,受电网阻抗影响不大,但是由于其价格昂贵,在配电网中完全取代无源装置并不现实。

#### (3) 混合装置

为了保障电能质量,配电网中通常会装设一些无源装置。为了合理利用这些无源装置,避免资源浪费,混合补偿装置可以通过在原有无源装置侧并联有源装置来实现<sup>[18]</sup>。混合装置的无源部分由具有无功补偿功能的无源滤波器组成,能够补偿大容量固定无功功率和特定频次谐波电流,有源部分相当于一个增强型有源电力滤波器,能够动态补偿谐波、不平衡和无功<sup>[19]</sup>。由于在实际运行中无源装置无功补偿效果能满足配网功率因数要求,有源装置谐波

和不平衡补偿效果较好, 所以混合装置中无源部分主要补偿大容量无功功率和特定频次谐波电流, 有源部分主要补偿不平衡和除无源补偿频次以外的谐波电流。

图 2 为混合补偿装置的控制框图。检测负载电流, 分别计算负载功率因数、负序电流、零序电流和谐波电流, 将功率因数分配到无源部分作为无源部分的投切指令, 将负序电流、零序电流和除无源部分滤除频次外的谐波电流分配到有源部分作为有源部分补偿的指令电流, 再通过电流跟踪电路对补偿电流进行指令跟踪控制。混合装置综合了有源与无源装置的优点, 兼顾成本与补偿效果, 通过合适的控制能实现较强稳定性<sup>[20-21]</sup>, 应用前景良好。

由于谐波电流亦能分解为正序、负序和零序分量, 为了避免歧义, 特此说明本文所述的负序和零序电流均指由基波电流不平衡产生的电流分量。

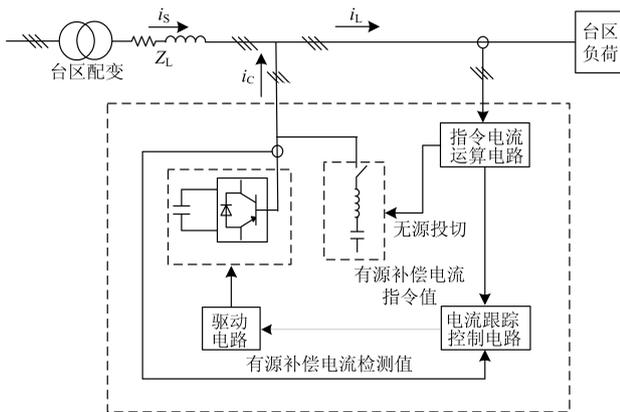


图 2 混合补偿装置的控制框图

Fig. 2 Control chart of hybrid compensator

## 2 复杂工况及三类装置的补偿效果

### 2.1 复杂工况介绍

为了深入调研配电网电能质量补偿装置的实际运行工况, 于 2016 年 8 月 1 日到 2016 年 8 月 31 日, 采用电能质量分析仪对广东省中山市某配电台区进行实地测试。分析实测数据发现, 台区负荷每天之间的变化较小, 但在同一天中不同时间段的差异较为明显, 故选取其中一天的实测数据对装置运行工况进行分析。

图 3 所示为 2016 年 8 月 11 日到 12 日的实测负荷特性曲线, 可以看出, 配电台区同时具有无功、不平衡和谐波的电能质量问题。实际应用中, 电能质量补偿装置多针对于单一电能质量问题进行补偿, 运行工况简单, 而配电台区中无功、不平衡、谐波等电能质量问题同时存在, 装置运行工况复杂, 各类装置补偿效果存在差别, 经济性分析也变得困

难。此外, 配电台区中无功功率、不平衡度和各次谐波含量在一天之内处于变动状态, 这使得补偿装置的运行工况更加复杂。本文将针对无功、不平衡和谐波同时存在的复杂工况, 对三类补偿装置的补偿效果进行仿真验证, 在此基础上, 对三类装置的净现值进行深入分析。对于变动状态复杂工况下的补偿装置补偿效果与净现值分析, 本团队将在后续研究工作中进行更加深入的探讨。

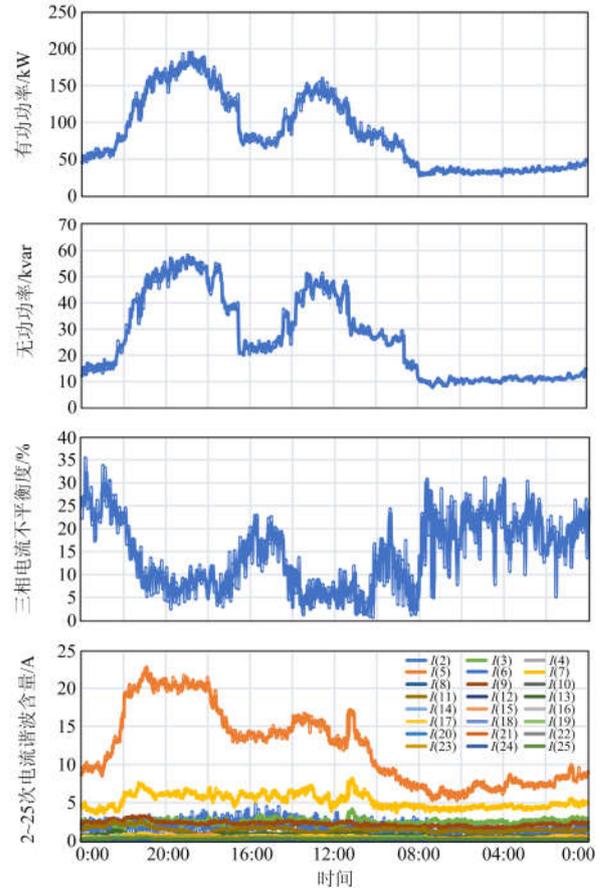


图 3 实测日负荷特性曲线

Fig. 3 Measured daily load characteristic curve

### 2.2 复杂工况下三类装置的补偿效果

针对配电网复杂电能质量问题, 本文在 PSCAD 软件下搭建典型三相四线制配电台区模型, 分别对三类补偿装置的补偿效果进行仿真分析。其中, 无源装置和混合装置的无源部分设计为具有无功补偿功能的 5 次无源滤波器, 补偿无功和 5 次谐波; 混合装置的有源部分补偿谐波和不平衡; 有源装置补偿谐波、不平衡和无功功率, 各装置无功补偿均采用定功率因数控制, 目标功率因数设为 0.95。

三类装置的补偿效果如图 4 所示, 补偿前后台区的各电能质量参数变化如表 1 所示。从图 4 和表

1 可以看出, 在无功补偿上, 三类装置补偿效果均较良好, 其中有源装置由于控制灵活, 补偿结果较为精确, 而无源和混合装置采用无源设备补偿无功, 虽然与目标功率因数有差, 但是补偿效果能被接受。在滤除谐波上, 有源装置能滤除各次谐波, 效果最好; 无源装置只能滤除 5 次谐波, 效果最差; 混合装置被控制为无源部分滤除 5 次谐波, 有源装置滤除其他频次谐波, 由于无源装置谐波滤除率较有源装置低, 所以混合装置整体的谐波滤除效果较有源装置差。在不平衡补偿上, 无源装置不能实现不平衡补偿功能, 因此效果最差; 有源和混合装置均采用有源设备补偿不平衡, 补偿效果相近并且良好。

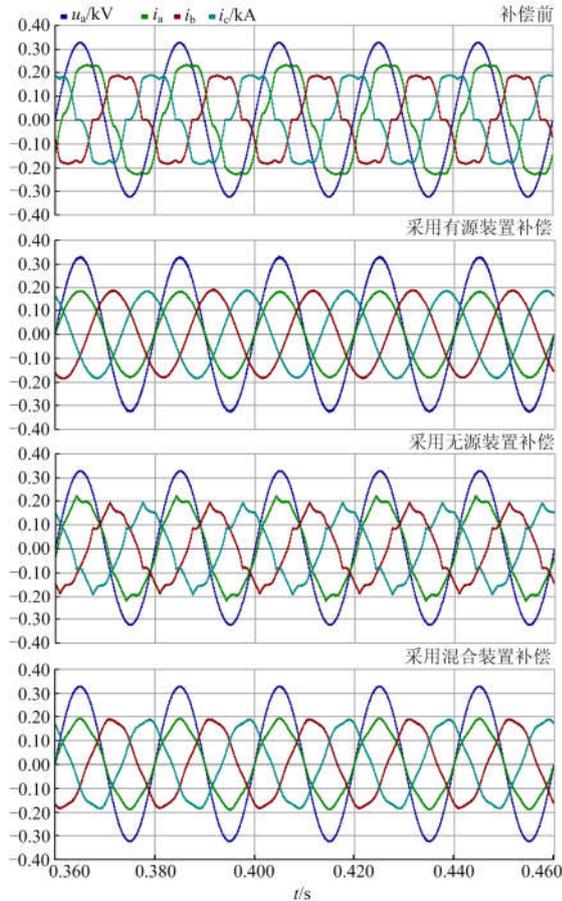


图 4 实测日负荷特性曲线  
Fig. 4 Measured daily load characteristic curve

表 1 三类装置补偿前后台区的电能质量参数表

Table 1 Power quality parameters before and after compensation

	功率因数	电流谐波畸变率/%	电流不平衡度/%
补偿前	0.871	12.82	19.57
有源	0.950	0.73	2.67
无源	0.948	7.88	15.22
混合	0.948	4.77	4.15

所以单纯考虑补偿效果, 有源装置最佳, 混合次之, 无源最差。但是考虑到装置成本, 装置整体补偿经济性则可能与补偿效果的结果不同, 加之配电网负载特性复杂多变, 装置运行中待补偿的谐波、不平衡和无功功率也处于复杂变化中。因此, 若确定经济性最优的补偿方案, 需在各类补偿效果分析的基础上进行经济性评估。

### 3 复杂工况下三类补偿装置净现值分析

本文将采用在电能质量领域应用较为成熟的经济性评估方法——净现值法<sup>[22]</sup>, 对三类补偿装置进行经济性分析, 给出复杂工况下经济效益最优的补偿装置选择方法。

净现值法用于分析投资方案对用户价值的预期影响, 其本质是计算投资方案的价值与其成本的差。通过将项目寿命内每年的净收益按照规定的折算率折现到项目方案开始点上的现值进行累加, 然后进行比较, 来决定方案的取舍或不同方案的优劣<sup>[23]</sup>。净现值的计算可用式(1)表示。

$$NPV = \sum_{t=0}^n (CI_t - CO_t)(1+r)^{-t} \quad (1)$$

式中:  $NPV$  为净现值;  $CI_t$  为第  $t$  年的现金流入量;  $CO_t$  为第  $t$  年的现金流出量;  $CI_t - CO_t$  为第  $t$  年的净现金流量;  $r$  为折现率;  $n$  为项目寿命, 单位通常为“年”。

$NPV$  不小于零, 说明方案可行, 在投资生命周期结束之前可以收回初始成本并获得效益, 并且净现值越高, 效益也越高。本文将针对三类电能质量补偿装置, 详细分析其净现值计算过程并对所得净现值进行比较。

#### 3.1 成本分析

补偿装置的成本主要包括初始投资成本和年变动成本两部分。在以下计算中, 各物理量脚标  $m=1, 2, 3$ , 分别代表有源、无源、混合装置。

初始投资成本为装置一次性投入成本, 包括装置的采购和实施成本, 即  $t=0$  时的现金流出量。

采购成本与补偿装置的容量有关。设三类装置中有源设备容量为  $x_m$  A, 无源设备容量为  $y_m$  kvar, 有源设备单位补偿容量价格为  $a$  元/A, 无源设备单位补偿容量价格为  $b$  元/kvar, 则三类装置的采购成本( $FC$ )可以表示为

$$FC_m = x_m a + y_m b \quad (2)$$

实施成本是指装置的安装实施费用, 设安装一套装置总费用为  $c_m$ 。

所以三类装置初始投资成本, 即  $t=0$  时的现金流出量( $CO_0$ )可以表示为

$$CO_{0m} = FC_m + c_m \quad (3)$$

年变动成本是补偿装置运行中每年的现金流出量, 包括维护成本和运行成本。

维护成本指装置安装后与使用该装置有关的更换、维修与保养等费用。由于装置实施中不存在被专人实时维修和定期保养, 因此这部分成本为装置损坏或故障的更换成本, 主要由无源设备产生, 与无源设备的寿命和投切次数有关。设电容器投切寿命为  $d_n$ , 年投切次数为  $d$ , 则每年需要更换的电容器台数为  $n=d/d_n$  台, 设无源设备由  $N$  组等容电容器组成, 则每组电容器价格为  $by/N$ , 所以三类装置的年维护成本( $MC$ )可以表示为

$$MC_m = \frac{dby_m}{Nd_n} \quad (4)$$

运行成本主要是指装置在运行中的有功损耗所导致的费用。设有源设备年损耗量与其容量比值为  $s_1$ , 无源设备年损耗量与其容量比值为  $s_2$ , 成本电价为  $e$ , 装置年运行时长为  $h$ , 则三类装置的年运行成本( $WC$ )可以表示为

$$WC_m = (\sqrt{3} \cdot x_m \cdot 0.38 \cdot s_1 + y_m \cdot s_2) \cdot h \cdot e \quad (5)$$

所以装置的变动成本, 即三类装置投运后寿命周期内每年的现金流出量( $CO_v$ )可以表示为

$$CO_{vm} = MC_m + WC_m \quad (6)$$

根据式(1), 将装置寿命周期内每年的现金流出量折合到当前货币价值, 得装置成本现值( $O$ )的表达式为

$$O = \sum_{t=0}^n CO_t(1+r)^{-t} = CO_0 + \sum_{t=1}^n CO_v(1+r)^{-t} = CO_0 + CO_v \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \quad (7)$$

所以三类装置的成本现值可以表示为

$$O_m = CO_{0m} + CO_{vm} \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \quad (8)$$

### 3.2 产出分析

电能质量补偿装置装设在低压配电台区, 主要功能是补偿台区的三相不平衡电流、谐波电流和无功电流, 其经济效益体现在装置投运后减少的台变和线路电能损耗。对补偿装置的产出分析如下。

设补偿前台区的负序电流和零序电流有效值分别为  $I_2$  和  $I_0$ , 变压器和线路的负序电阻分别为  $R_{T2}$

和  $R_{L2}$ , 零序电阻分别为  $R_{T0}$  和  $R_{L0}$ , 则三类装置投运后降低的不平衡损耗可表示为

$$\begin{cases} \Delta P_{U1} = 3I_2^2(R_{T2} + R_{L2}) + 3I_0^2(R_{T2} + R_{L2}) \\ \Delta P_{U2} = 0 \\ \Delta P_{U3} = 3I_2^2(R_{T2} + R_{L2}) + 3I_0^2(R_{T2} + R_{L2}) \end{cases} \quad (9)$$

设补偿前台区的各次谐波电流有效值为  $I_n$ , 混合装置有源部分滤除的各次谐波电流有效值为  $I_{an}$ , 无源装置和混合装置无源部分滤除的谐波电流有效值为  $I_{bn}$ , 有源设备和无源设备的谐波滤除率分别为  $k_1$  和  $k_2$ , 变压器和线路等效电阻分别为  $R_T$  和  $R_L$ ,  $n$  次谐波下的谐波阻抗分别为  $R_{Tn} = \sqrt{n}R_T$  和  $R_{Ln} = \sqrt{n}R_L$ , 则三类装置投运后降低的谐波损耗可表示为

$$\begin{cases} \Delta P_{h1} = 3 \sum_n (k_1 I_n)^2 \sqrt{n} (R_T + R_L) \\ \Delta P_{h2} = 3 \sum_{bn} (k_2 I_{bn})^2 \sqrt{bn} (R_T + R_L) \\ \Delta P_{h3} = 3 \left[ \sum_{an} (k_1 I_{an})^2 \sqrt{an} + \sum_{bn} (k_2 I_{bn})^2 \sqrt{bn} \right] (R_T + R_L) \end{cases} \quad (10)$$

设补偿前台区功率因数为  $\cos \varphi_1$ , 补偿后功率因数为  $\cos \varphi_2$ , 有功功率为  $P$ , 则三类装置投运后降低的无功损耗可表示为

$$\Delta P_{Rm} = 3 \left[ \frac{P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)}{\sqrt{3} \times 380} \right]^2 (R_T + R_L) \quad (11)$$

设产出电价为  $f$ , 则三类装置的产出效益, 即装置投运后寿命周期内每年的现金流入量( $CI_t$ )可以表示为

$$CI_{tm} = (\Delta P_{Um} + \Delta P_{hm} + \Delta P_{Rm}) \cdot hf \quad (12)$$

根据式(1), 将装置寿命周期内每年的现金流入量折合到当前货币价值, 得装置产出现值  $I$  的表达式为

$$I = \sum_{t=1}^n CI_t(1+r)^{-t} = CI_t \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \quad (13)$$

所以三类装置的产出现值可表示为

$$I_m = CI_{tm} \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \quad (14)$$

### 3.3 净现值分析

根据式(1), 三类电能质量补偿装置的净现值( $NPV_m$ )可表示为产出现值与成本现值之差。

$$NPV_m = \sum_{t=0}^n (CI_{tm} - CO_{tm})(1+r)^{-t} = I_m - O_m \quad (15)$$

所以根据式(8)和式(14), 三类补偿装置的净现值表达式如表 2 所示。

表 2 三类补偿装置的净现值表达式  
Table 2 NPV expressions of three compensators

净现值表达式	
有源	$NPV_1 = [(\Delta P_{U1} + \Delta P_{h1} + \Delta P_{R1})hf - 0.658x_1s_1he] \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} - (x_1a + c_1)$
无源	$NPV_2 = [(\Delta P_{U2} + \Delta P_{h2} + \Delta P_{R2})hf - \frac{dby_2}{N_2d_n} - y_2s_2he] \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} - (y_2b + c_2)$
混合	$NPV_3 = [(\Delta P_{U3} + \Delta P_{h3} + \Delta P_{R3})hf - \frac{dby_3}{N_3d_n} - 0.658x_3s_1he - y_3s_2he] \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} - (x_3a + y_3b + c_3)$

#### 4 复杂工况下净现值大小关系区域划分

从表 2 所示公式可以看出，当配变、线路和装置参数确定后，三类装置的净现值大小主要取决于谐波、不平衡和无功电流这些运行工况参数。

表 3 配电台区的变压器和线路参数表  
Table 3 Parameters of transformer and line

参数名称	参数数值
变压器额定容量/kVA	200
变压器额定电压/kV	0.38
变压器接线方式	Yyn0
变压器短路阻抗标幺值/p.u.	0.08
变压器短路阻抗有名值/ $\Omega$	0.06
变压器零序阻抗/正序阻抗	15
变压器电抗/电阻	1
变压器正、负序电阻/ $\Omega$	0.05
变压器零序电阻/ $\Omega$	0.74
线路阻抗标幺值/p.u.	0.04
线路电阻/ $\Omega$	0.03

表 4 三类补偿装置参数表

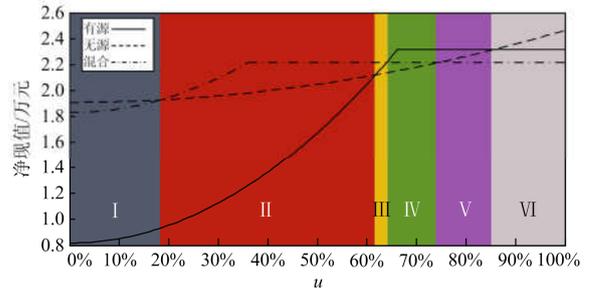
Table 4 Parameters of three compensators

参数名称	参数数值
有源装置容量/kVA	80
无源装置容量/kVA	80
混合装置容量/kVA	80
混合装置有源与无源容量配置	1:1
有源设备价格/(元/A)	400
无源设备价格/(元/kvar)	100
装置寿命/年	15
有源设备损耗占比/%	2
无源设备损耗占比/%	1
有源设备谐波滤除率/%	95
无源设备谐波滤除率/%	70
实施安装成本/(元/套)	1 000
年运行时间/h	365×24

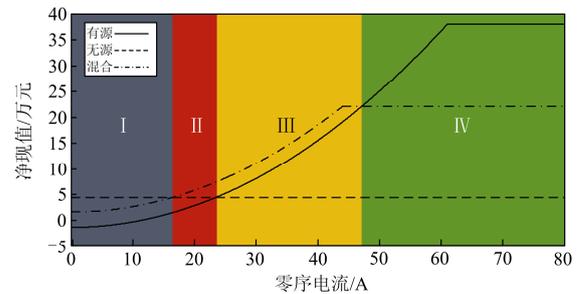
为了研究复杂工况下三类装置的净现值分布情况，根据表 2 公式，采用表 3 所示的典型配变和线路参数以及表 4 所示的装置参数，分析并计算三类装置净现值大小随运行工况的分布情况。

取折现率为 10%，成本电价为 0.51 元/kWh，产出电价为 0.67 元/kWh，得出三类装置的净现值分布区域随谐波电流、零序电流、负序电流和无功功率的变化关系如图 5 所示。

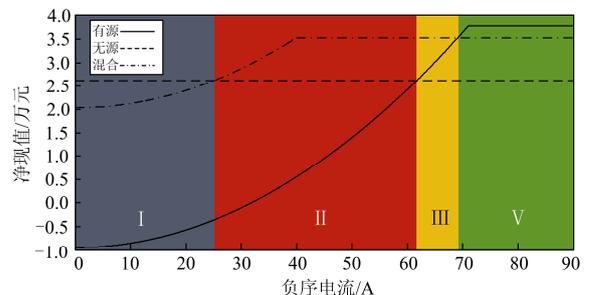
从图 5 可以看出，运行工况的变化将三种装置的净现值分布划分为 6 个区域，每个区域代表三种装置净现值的一个大小关系，图中有源和混合装置净现值曲线的拐点处表示待补偿电流已达到装置的额定容量。



(a) 净现值随谐波电流变化的分布区域图



(b) 净现值随零序电流变化的分布区域图



(c) 净现值随负序电流变化的分布区域图

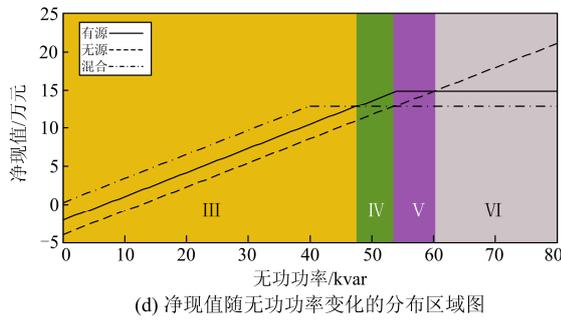


图 5 三类装置净现值随运行工况变化的分布区域图

Fig. 5 NPV distribution area of three compensators varies with operating conditions

图 5(a)所示为三类装置净现值随谐波电流的变化情况, 横坐标  $u$  表示 5~25 奇数次谐波含量。从图 5(a)可以看出, 当台区谐波含量处于装置额定容量较小或者超出额定容量较大水平时, 无源装置的净现值最高, 经济效益最好; 当谐波含量处于装置额定容量中等或中等偏低水平时, 混合装置的净现值最高; 当谐波含量处于装置额定容量中等偏高水平或超出额定容量较少时有源装置的净现值最高。

图 5(b)所示为三类装置净现值随零序电流的变化情况。由于配电台区多采用 Yyn0 接线形式的变压器, 零序阻抗较高, 是正序阻抗的 15 倍<sup>[24]</sup>, 所以零序电流含量较高时损耗较为严重。从图 5(b)中可以看出, 由于无源装置不能补偿零序电流, 所以其净现值是一条直线, 不随零序电流含量变化, 当台区零序电流水平较低时, 无源装置净现值最高; 由于混合装置有源部分容量比有源装置小, 所以混合装置的净现值曲线先出现拐点, 当零序电流处于装置额定容量中等水平时, 混合装置净现值较高; 当零序电流含量较高时, 有源装置的净现值最高。

图 5(c)所示为三类装置净现值随负序电流的变化情况。负序电流同零序电流一样属于台区不平衡电流, 但是由于配变负序阻抗小于零序阻抗, 因此负序电流变化所导致净现值的变化程度没有零序电流大。但从图中可以看出, 三类装置净现值随负序电流的变化趋势与随零序电流的变化趋势基本一致: 当负序电流较小时, 无源装置净现值最高; 当负序电流处于装置额定容量中等水平时, 混合装置净现值最高; 当负序电流处于较高水平时, 有源装置含量最高。

图 5(d)所示为三类装置随无功功率的变化情况。由于混合装置无功补偿容量最少, 因此最先出现拐点。当台区无功功率较低时, 混合装置的净现值最高; 当无功功率处于装置额定容量中等水平或

超出额定容量较低水平时, 有源装置的净现值最高; 当无功功率超过额定容量较高水平时, 无源装置的净现值最高。

通过对图 5 所示的净现值变化情况分析, 对复杂工况下三类装置在不同区域的净现值进行比较得到表 5。

表 5 不同区域下三类装置的净现值比较  
Table 5 NPV comparison of three compensators in different areas

区域	净现值比较
I	无源>混合>有源
II	混合>无源>有源
III	混合>有源>无源
IV	有源>混合>无源
V	有源>无源>混合
VI	无源>有源>混合

## 5 实例分析

本文采用广东省中山市某配电台区的实测数据, 对复杂工况下三类补偿装置的净现值分布区域进行实例分析。

表 6 所示为实测数据表, 设置目标功率因数为 0.95, 无源装置和混合装置的无源部分补偿 5 次谐波, 折现值取 10%, 成本电价和产出电价取当地实际价格分别为 0.51 元/kWh 和 0.67 元/kWh。

表 6 实测数据表  
Table 6 Measured data

参数	数值
有功功率/kW	95.159
功率因数	0.81
零序电流/A	26.27
负序电流/A	11.07
基波电流/A	177.90
总谐波电流/A	30.14
5 次谐波电流/A	18.27
谐波电流畸变率/%	11.52

根据表 4 和表 5 数据以及式(8)、式(14)和表 2 公式, 可计算出有源、无源和混合三类补偿装置的成本现值、产出现值和净现值如表 7 所示。

表 7 三类装置的净现值计算结果  
Table 7 NPV of three compensators

	有源	无源	混合
成本现值/万元	10.267 6	4.125 5	7.196 6
产出现值/万元	13.512 5	4.368 1	12.795 6
净现值/万元	3.244 9	0.242 5	5.602

通过计算结果可以看出,三类补偿装置净现值均大于零,混合装置净现值最大,说明在该实例中采用混合装置所得电能质量补偿的经济性最优。

## 6 结论

本文在分析配电网电能质量补偿系统和装置的基础上,基于实测数据对补偿装置的运行工况进行深入调研。针对复杂工况下有源、无源和混合三类装置补偿效果的仿真结果,采用净现值法对三类补偿装置在复杂工况下的经济性进行评估并进行实例计算,可得具体结论如下:

(1) 基于净现值表达式,计算并得到了复杂工况下三类补偿装置随谐波、不平衡电流和无功功率变化时净现值大小关系的变化区域。

(2) 根据复杂工况下三类装置的净现值变化区域可得:当待补偿电流在装置额定容量以内并且水平较小时,采用无源装置经济性更佳(区域 I);当待补偿电流处于装置容量中等水平时,采用混合装置经济性更佳(区域 II 和 III);当待补偿电流在装置额定容量以内并且水平较高时,采用有源装置经济性更佳(区域 IV);当待补偿电流超过装置额定容量较少时,采用有源装置经济性更佳(区域 V);当待补偿电流超过装置额定容量较多时,采用无源装置经济性更佳(区域 VI)。

## 参考文献

- [1] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [2] 孟金岭, 赵伟, 林国营, 等. 双谐振注入混合型有源电力滤波器特性[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 32-38.  
MENG Jinling, ZHAO Wei, LIN Guoying, et al. Dual resonance injection hybrid active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 32-38.
- [3] 李博, 李欣. 并联有源电力滤波器解耦控制研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 164-170.  
LI Bo, LI Xin. Research on decoupling control of shunt active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 164-170.
- [4] 李正明, 高远, 潘天红. 基于复合控制的有源电力滤波器电流控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 55-61.  
LI Zhengming, GAO Yuan, PAN Tianhong. Current control strategy of active power filter based on compound control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 55-61.
- [5] MCGRANAGHAN M, ROETTGER B. Economic evaluation of power quality[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(2): 8-12.
- [6] 杨振宇, 赵剑锋, 唐国庆. 成本效益分析在电能质量经济评估中的应用[J]. 现代电力, 2005, 22(3): 80-84.  
YANG Zhenyu, ZHAO Jianfeng, TANG Guoqing. Application of cost-benefit analysis in economic evaluation of power quality[J]. Modern Electric Power, 2005, 22(3): 80-84.
- [7] ZHANG Y, MILANOVIC J V. Techno-economic improvement of voltage sag performance with FACTS devices[C] // 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, October 9-11, 2007, Barcelona, Spain: 1-6.
- [8] MILANOVIC J V, ZHANG Y. Global minimization of financial losses due to voltage sags with FACTS based devices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 298-306.
- [9] 周作春, 钱叶牛, 王玥娇, 等. 用户级事件型电能质量治理方案的经济性评估[J]. 电气应用, 2013(增刊 1): 85-90.  
ZHOU Zuochun, QIAN Yeniu, WANG Yuejiao, et al. Economic evaluation of user level event power quality management scheme[J]. Electrical Application, 2013(S1): 85-90.
- [10] 张勇军, 廖民传. 配电线路 10/0.4 kV 综合无功优化配置建模[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(3): 41-45.  
ZHANG Yongjun, LIAO Minchuan. Modeling of 10/0.4 kV reactive power optimization for distribution lines[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2009, 21(3): 41-45.
- [11] 何谋超, 胡新瑞, 龚正. 基于全寿命周期的城市变电站无功补偿配置研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(3): 10-13.  
HE Mouchao, HU Xinrui, GONG Zheng. Research on reactive power compensation configuration of urban substation based on life cycle[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(3): 10-13.
- [12] 雷林绪, 李璐, 刘颖英, 等. 电能质量治理经济评估方法适用性分析与改进[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(6): 1-6.  
LEI Linxu, LI Lu, LIU Yingying, et al. Applicability analysis and improvement of power quality management economic evaluation method[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(6): 1-6.
- [13] DABRA V, PALIWAL K K, SHARMA P, et al. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 29-39. DOI: 10.1186/s41601-017-0036-2.

- [14] 钟迪, 李启明, 周贤, 等. 多能互补能源综合利用关键技术研究现状及发展趋势[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 1-5.  
ZHONG Di, LI Qiming, ZHOU Xian, et al. Research status and development trends for key technologies of multi-energy complementary comprehensive utilization system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 1-5.
- [15] 范苏纯, 江浩侠, 曹琪娜, 等. 基于王氏定理的台区三相不平衡补偿与应用[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 111-119.  
FAN Suchun, JIANG Haoxia, CAO Qina, et al. Three-phase unbalanced compensation in transformation region and its application based on wang's theorem[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 111-119.
- [16] 刘轩, 张勇军, 周俊煌. 适应波动性负荷接入的 D-STATCOM 滞回运行策略[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 108-114.  
LIU Xuan, ZHANG Yongjun, ZHOU Junhuang. D-STATCOM hysteretic operation strategy adapting to fluctuant load accessing[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 108-114.
- [17] FURUHASHI T, OKUMA S, UCHIKAWA Y. Study on the theory of instantaneous reactive power[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1990, 37(1): 86-90.
- [18] 张秀娟, 赵香花, 袁涛. 有源电力滤波器与无源滤波器混合使用的研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(5): 84-86.  
ZHANG Xiujuan, ZHAO Xianghua, YUAN Tao. Research on hybrid application of active power filter and passive filter[J]. Power Electronics, 2012, 46(5): 84-86.
- [19] RIBEIRO R L D A, AZEVEDO C C D, SOUSA R M D. A robust adaptive control strategy of active power filters for power-factor correction, harmonic compensation, and balancing of nonlinear loads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 718-730.
- [20] FANG Z, WU L, ZHE C, et al. Study on a control method of PAPF for resonance damping and harmonics compensation in power system[C] // 2009 6th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, May 17-20, 2009, Wuhan, China: 1161-1167.
- [21] WU L, ZHUO F, ZHANG P, et al. Stability analysis and controller design of hybrid compensation system with parallel active power filter and parallel capacitors[C] // 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 17-21, 2007, Orlando, FL, USA: 1105-1111.
- [22] 鲁敬妮, 屠珊, 王红娟, 等. 吸收式热泵回收机组余热经济性分析[J]. 热力发电, 2017, 46(2): 136-140.  
LU Jingni, TU Shan, WANG Hongjuan, et al. Economical efficiency of waste heat recovery from a 12 MW steam turbine by absorption heat pump[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(2): 136-140.
- [23] WETEKAMP W. Net present value (NPV) as a tool supporting effective project management[C] // Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, September 15-17, 2011, Prague, Czech Republic: 898-900.
- [24] 杨云龙, 王凤清. 配电变压器三相不平衡运行带来的附加损耗、电压偏差及补偿方法[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 73-76.  
YANG Yunlong, WANG Fengqing. Additional loss, voltage deviation and compensation method for unbalanced operation of distribution transformer[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 73-76.

收稿日期: 2018-01-02; 修回日期: 2018-03-01

作者简介:

袁 敞(1981—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为电能质量分析与控制, 电力电子技术在电力系统中的应用等; E-mail: yc\_ncepu@163.com

郝 毅(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制等。E-mail: 15201308275@163.com

(编辑 许 威)